第40卷 第6期
2023年6月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 6
Jun. 2023

基于三维识别的中国干旱事件演变特征分析

吕潇雨[1]， 郭 浩[1]， 孟翔晨[1]， 包安明[2]， 田芸菲[1]， 朱 丽[1]

（1. 曲阜师范大学地理与旅游学院，山东 日照 276826；
2. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：中国是世界上受干旱影响最严重的国家之一，干旱频发给我国经济社会发展和生态环境造成严重影响。为分析近40 a干旱事件的时空特征，本文结合三维聚类算法，从干旱事件时空联动的本质出发，识别中国1981—2020年间干旱事件并定量分析干旱事件的时空动态演变过程。主要结论如下：三维聚类算法能有效识别干旱事件及其动态变化过程。中国1981—2020年间发生持续2个月及以上的干旱事件102场，空间上，干旱事件空间轨迹倾向于自东向西发展；时间上，干旱事件时间重叠度较高，长历时干旱多具有多峰特点。此外，覆盖范围广且严重度高的干旱事件集中发生于2005—2010年。本文结论有助于发现中国干旱事件的时空演化规律，为我国干旱监测和干旱风险管理提供科学参考。

关键词：三维聚类算法；干旱事件；三维演变特征；动态演变；SPEI；中国

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)将干旱定义为“一段时间足以导致严重水文失衡的异常干旱天气”[1]。近年来，随着全球气温的升高，干旱事件发生的频次、覆盖面积均有增加[2]。中国地处典型季风气候区，干旱灾害的影响突出，每年造成的粮食减产从数百万吨到数千万吨不止，干旱造成的直接经济损失高达440×10^8元·a^{-1}[3-4]。科学识别干旱事件并定量描述其特征是分析干旱时空演变规律的前提，能否准确识别干旱事件，并定量化分析干旱事件的时空特征及其发展过程是干旱防灾减灾和预测的前提条件[5]。

干旱是一种异常的气象水文现象，一场干旱通常被称为一次干旱事件。要深化干旱变化规律的认识，首先需准确识别并提取干旱事件，而后进行多特征分析。一场干旱事件实质上是一个时空联动的过程，既在时间维度上演化也在空间维度上变化。传统干旱事件识别方法多样，比如阈值水平法、游程理论法、小波变换法、经验正交函数等。大量学者基于以上方法开展了干旱监测的相关研究，为干旱事件识别和干旱特征定量化分析提供了重要参考，如任朝霞等[6]基于百分位阈值法分析西北干旱区极端气候变化趋势；李天水等[7]基于游程理论和Copula函数的联合应用，为区域干旱风险评估提供参考；Huang等[8]利用交叉小波分析方法对渭河流域水文干旱与气象干旱的相关性进行了研究。经验正交函数(EOF)和旋转经验正交函数(REOF)也被广泛应用于气象要素时空特征分析[9-10]。然而，以上方法局限于一维或二维层面，多通过将三维空间压缩为二维或一维来简化干旱事件的三维结构。比如固定区域干旱指数的时间变化(一维)或某一时间段内干湿状况的空间分布图(二维)等。而干旱事件是一个三维尺度下的干湿异常问题，既在空间上发展也在时间上变化，降维处理固然能够更为迅速地提取干旱事件并进行分析，但同时也会破坏干旱事件的三维时空结构，进而导致干旱路径、发展过程、移动方向等关键信息的丢失。

为解决上述问题，近年来，部分国内外学者聚焦三维视角下的干旱事件识别与特征定量化研究，并且取得了一定的进展。Andreadis等[11]利用聚类算法识别干旱事件及其空间范围，并建立了干旱严重程度-面积-持续时间(SAD)曲线，将每一次干旱

收稿日期：2022-10-11； **修订日期**：2023-02-20
基金项目：国家自然科学基金(42001363)；山东省高校优秀青年创新团队项目(2022KJ178)；山东省自然科学基金项目(ZR2021QD055)
作者简介：吕潇雨(1999-)，女，硕士，主要从事气象干旱监测的研究. E-mail: lvxiaoyu@qfnu.edu.cn
通讯作者：郭浩. E-mail: guohao@qfnu.edu.cn

的面积与其严重程度联系起来。后来，Lloyd-Hughes等[12]扩展了SAD干旱识别方法，明确了干旱事件的三维（经度、纬度、时间）结构，并通过逐一识别干旱指数三维立方体（3×3×3）内的干旱像元点的方式实现干旱事件的识别；Guo等[5]对传统三维聚类算法进行了改进，从历时、严重度、烈度、质心等多个变量来度量干旱事件，并分析了亚洲中部地区干旱事件的时空演化特征；Liu等[13]通过三维空间内气象干旱聚类和水文干旱聚类的重叠情况研究了气象干旱向水文干旱的演变过程；Wen等[14]绘制三维阈值等值面，聚类时空互联网格点，形成三维干旱结构，表征干旱事件，描述了干旱发展过程中的时空分布格局和时空变异性；Xu等[15]基于三维聚类方法识别了1961—2012年中国季风区的干旱事件，并通过历时、受影响面积、严重程度、强度和质心等多个特征变量来度量干旱事件；冯凯等[16]基于三维干旱识别方法分析了黑河流域干旱时空连续动态演变特征；邓翠玲等[17]将图像三维连通性识别方法应用于长江流域的气象干旱事件的识别和提取。

随着气候变化和人类活动的不断加剧，中国的干旱事件不断频发且有进一步加剧的趋势，干旱时空特征日趋复杂，然而中国干旱事件时空演变规律仍不清晰，对干旱发生发展过程的认识仍有待深入。因此，本文基于三维聚类算法从时空联动的视角出发识别中国1981—2020年间的干旱事件，在分析干旱发生时间、历时、严重度、烈度等常规静态特征的基础上，定量化研究干旱事件的发展过程、移动路径等动态演变特征，旨在深化对干旱事件时空演变规律的认识，促进干旱识别与特征定量化的发展，为干旱风险管理和干旱预测提供科学参考。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

中国位于亚洲东部、太平洋西岸，地理坐标介于73°33′~135°05′E，3°51′~53°33′N之间，研究区域不包括台湾。地势西高东低，呈阶梯状分布，高程空间差异大。中国主要以季风气候为主，南北跨纬度广，太阳辐射能量空间异质性强。由于海陆热力性质差异，降水量从东南到西北逐渐降低，东南沿海地区年降水量在1600 mm以上，在秦岭-淮河附近减少到800 mm，大兴安岭-阴山-兰州-青藏高原东南部地区降水量约为400 mm，贺兰山-青藏高原中部200 mm，西海降水量减少到200 mm，而塔里木盆地年降水量则不足50 mm。旱涝灾害呈渐进变化，分布在全国各地，灾害从北向南更加多样化。干旱是中国北方地区的主要灾害类型，而洪水是南方地区最重要的灾害类型[18]。半个世纪以来，我国高温、强降水等极端天气气候事件趋多、趋强[19]，即使在一些通常被认为潮湿的地区干旱灾害现象也频繁发生[20]。干旱事件通常集中发生在华北平原至长江下游地区，华北平原西部、黄土高原、四川盆地和云贵高原有明显的干旱趋势[15]。频发的干旱带来了严重的损失，例如2022年夏季长江流域发生的罕见的重大干旱事件，对当地工农业生产、居民生活、生态安全等造成严重影响[21-23]。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 中国逐日降水分析产品CPAP　中国逐日降水分析产品（CPAP）来源于中国气象数据网（www.data.cma.cn），空间分辨率0.25°×0.25°。CPAP由国家气象信息中心（NMIC）和中国气象局（CMA）基于约2400个气象站点的降水数据，结合最优插值技术（OI）生产得到。图1给出了中国地区用于生成CPAP的气象站点分布。CPAP所用气象资料均经过极端值的检验，内部一致性检验和空间一致性检验的三级质量控制[24]。经验证与独立规范观测相比，CPAP在0.5°尺度下的相对偏差(RB)为3.21%[24]。研究表明，CPAP逐日降水资料与中国不同地区的观测结果有很好的一致性[25]。本文将日尺度CPAP累加至月尺度，用于计算干旱指数SPEI。

1.2.2 ERA5-Land　ERA5-Land是由欧洲中期天气预报中心生产的第五代新气候高分辨率再分析网格数据集，空间分辨率为0.1°，覆盖范围为90°S~90°N[26]。该数据集包括了自1981年以来，表征温度、湖泊、积雪、土壤水分、辐射和热量、蒸散和径流、风速、气压、降水量及植被的50种变量的月动态数据，具有时间序列长、时空分辨率高、变量丰富等优点。ERA5-Land在天气气候诊断、遥感数据同化、干旱监测等方面得到了广泛应用[27-28]。ERA5-Land提供了小时尺度和月尺度2种时间分辨率版本，本文从其官方网站（https://cds.climate.copernicus.eu/）下载得到1981年1月至2020年12月ERA5-Land的月尺度蒸散发（PET）网格数据用于计算

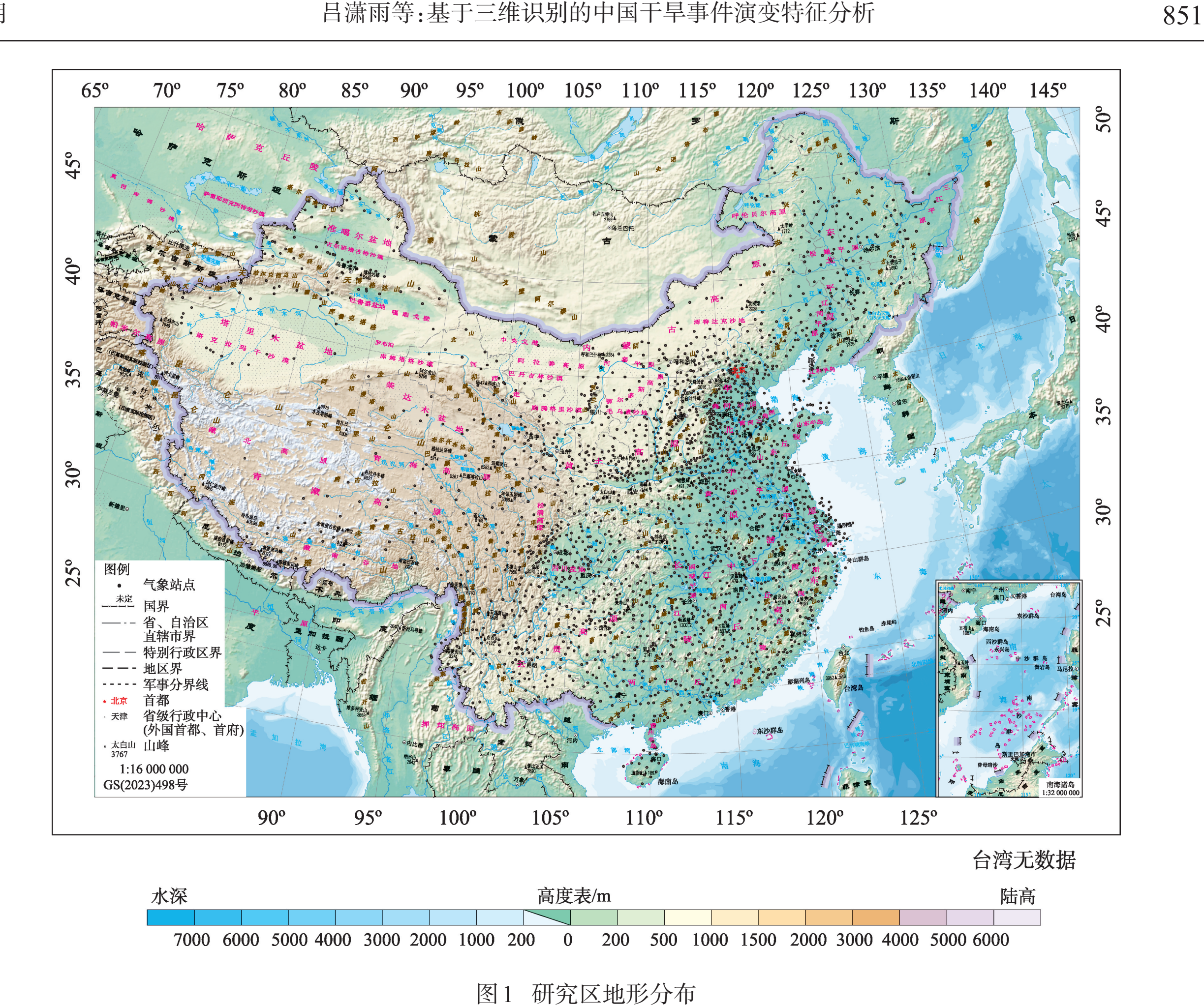


图1 研究区地形分布

Fig. 1 Spatial distribution of terrain in study area

SPEI干旱指数。该数据集中的PET是基于Penman-Monteith方程计算，经验证其适合于中国的干旱监测[29]。

2 研究方法

2.1 标准化降水蒸散指数SPEI

不同时间、不同地区的降水量差异巨大，因此很难通过降水量的大小进行时空尺度的比较[30]。标准化降水蒸散指数(SPEI)同时考虑了温度和降水，且具有多时间尺度特征和标准化特征，在实际应用中可消除降水时空差异，适用于干旱时空变化规律研究。前人研究表明[15,31]，3个月时间尺度的SPEI能够反映干湿变化的季节性特征，既不会因为时间太短导致SPEI值震荡剧烈，也不会因为时间太长而导致SPEI值变化过于平缓。本文基于1981—2020年(40 a)的降水观测插值数据和ERA5-Land数据集中的潜在蒸散发数据，利用R语言中SPEI包，计算得到3个月时间尺度的SPEI(即SPEI3)，计算步骤参考表1。

2.2 基于三维聚类算法的干旱事件识别方法

本研究选择阈值-1作为干旱状态的识别标准，即当SPEI3<-1时发生干旱则代表该地区处于干旱状态[32]。基于Guo等[5]的改进型三维聚类干旱事件识别方法识别干旱事件并定量化描述事件的时空演化特征。该方法具体步骤如下：

(1) 构建三维数据空间。以研究区的历年逐月SPEI3为基本数据，以经度(Lon)、纬度(Lat)和时间(t)为3个坐标轴(如图2步骤1)，建立SPEI3的三维数据空间。此时，该三维空间的大小是$N_{lat}\times N_{lon}\times N_t$。其中$N_{lat}$、$N_{lon}$和$N_t$分别代表SPEI三维数据空间中纬度格网数、经度格网数和时间范围(月数)。时间范围N_t即为SPEI干旱指数计算的时间范围，本文时间范围N_t范围设定为1981年1月至2020年12月。

(2) 干旱图斑识别。对每个月的SPEI3数据进行干旱状态识别，当某格点SPEI3的值<-1时则认为是干旱状态并将其标记为干旱格点。然后，识别当前月所有干旱格点并将相邻干旱格点标记为一个干旱图斑。

表1 SPEI计算步骤

Tab. 1 The calculation steps of SPEI

步骤	公式	备注
1	$D_j = P_j - \mathrm{PET}_j$	j表示月份；D_j表示第j月的降水（P_j）与该月潜在蒸散发（PET_j）的差值
2	$\begin{cases} X_{i,j}^k = \sum_{l=13-k+j}^{12} D_{i-1,l} + \sum_{l=1}^{j} D_{i,l}, & j<k \\ X_{i,j}^k = \sum_{l=j-k+j}^{j} D_{i-1,l}, & j \geqslant k \end{cases}$	$X_{i,j}^k$表示降水（P_j）与潜在蒸散发（PET_j）在k个月时间尺度上第i年j月的累加值
3	$F(X) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{X-\gamma}\right)^{\beta}\right]^{-1}$	$F(X)$是根据log-logistic分布得出的D_j序列的概率分布函数，其中α、β和γ分别代表尺度系数、形状系数和origin参数
4	$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2}$ $\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\tau\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\tau\left(1-\frac{1}{\beta}\right)}$ $\gamma = w_0 - \alpha\tau\left(\frac{1+1}{\beta}\right)\tau\left(1-\frac{1}{\beta}\right)$	w_0、w_1、w_2表示log-logistic分布的3个矩比参数，采用线性矩方法（L-moment）拟合获得；τ是Gamma分布函数
5	$p = 1 - F(x)$ $w = \begin{cases} \sqrt{-2\ln(p)}, & p \leqslant 0.5 \\ \sqrt{-2\ln(1-p)}, & p > 0.5 \end{cases}$ $\mathrm{SPEI} = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3}$	p是标准化的分布函数值；w是一个参数；c_0=2.515517，c_1=0.802853，c_2=0.010328，d_1=1.432788，d_2=0.189269和d_3=0.001308，相关参数来自于Vicente-Serrano等[32]

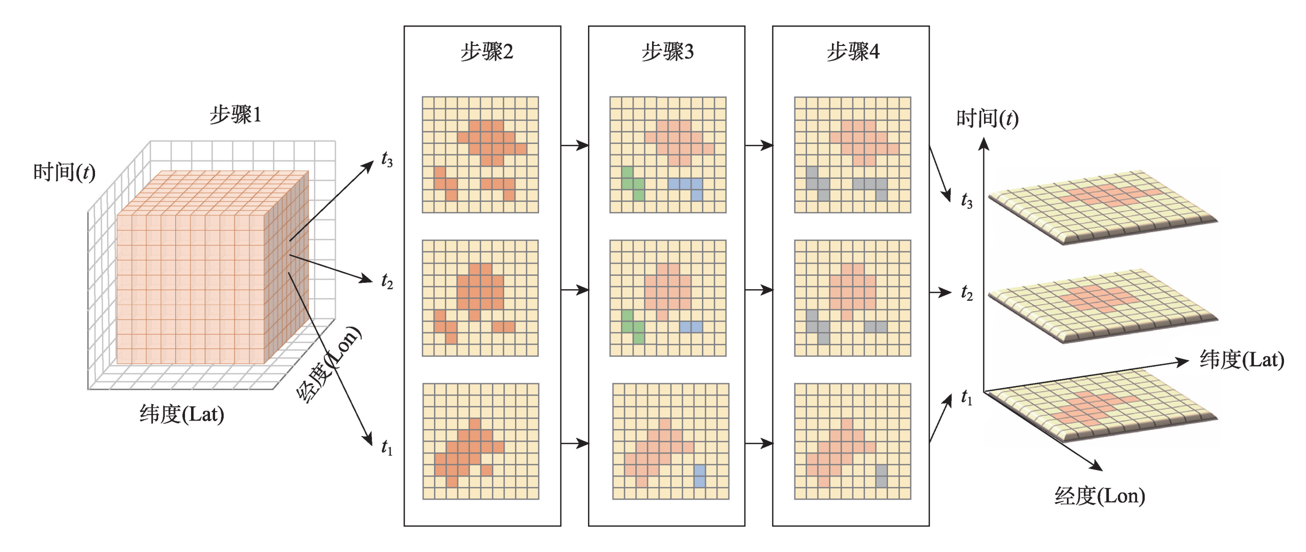


图2 基于三维聚类算法的干旱事件识别步骤

Fig. 2 Drought identification steps based on the three dimensional clutering algorithm

（3）干旱图斑筛选。在实际干旱事件分析过程中，覆盖面广、持续时间长的干旱是研究的重点，干旱碎斑影响有限且会扰乱干旱事件的识别。为避免干旱碎斑对干旱事件识别和特征定量化分析造成的影响[5]，本文仅考虑面积大于整个研究区面积的1.6%（15.36×10^4 km^2）的干旱图斑[33]。

（4）干旱事件识别。三维干旱事件是在干旱指标三维空间中，聚集在一起相互连通的干旱指标体素的集合。为确定一个干旱事件，需要定义相邻事件干旱图斑的重叠面积。根据Guo等[5]的研究，当两个相邻图层中，干旱图斑的重叠面积>6400 km^2时，将其认定为同一干旱事件。从第2个月开始重复步骤2直到所有月份的图层检查完成，提取干旱体素并赋予其唯一编号，即一场三维干旱事件。

2.3 干旱事件特征变量

本研究基于以下6种干旱特征来度量干旱

事件:

(1) 干旱持续时间(Drought Duration,DD)是指处于干旱状态下的时长,即干旱开始时间和干旱结束时间之间的月份数。

(2) 干旱严重度[34-35](Drought Severity,DS)是指干旱事件期间SPEI累加值的绝对值,公式如下:

$$DS=\sum_{i=1}^{DD}|SPEI_i| \tag{1}$$

式中:DD表示某一干旱事件的持续时间;$SPEI_i$表示第i个月的SPEI值。

(3) 干旱烈度[36](Drought Intensity,DI)是指干旱期间SPEI值的平均值,是干旱严重度DS与干旱持续时间DD的比值,公式如下:

$$DI=\frac{\sum_{i=1}^{DD}|SPEI_i|}{DD}=\frac{DS}{DD} \tag{2}$$

式中:DD表示某一干旱事件的持续时间;DS表示某一干旱严重度;$SPEI_i$表示第i个月的SPEI值。

(4) 干旱面积(Drought Area,DA)又称干旱范围(Drought Spatial Extent)或者干旱影响范围(Drought Influenced Area),是指某次干旱事件所涉及的最大范围,即干旱事件期间曾处于干旱状态的最大面积。

(5) 干旱质心(Drought Centroids,DC)为SPEI值在三维空间中的加权重心,它对于研究干旱的时空分布规律有着重要的作用。为刻画干旱事件的发展迁移过程,同时计算逐月干旱质心。

(6) 干旱迁移路径长度(Drought track length,DL)[37-38]为干旱轨迹的长度,即逐月干旱质心移动距离的总和,基于Haversine公式(https://en.wikipedia.org/wiki/Haversine_formula)计算两个质心之间的距离d,其计算过程见如下公式:

$$d=2r\arcsin\left(\sqrt{\sin^2\left(\frac{\varphi_2-\varphi_1}{2}\right)+\cos\varphi_1\cdot\cos\varphi_2\cdot\sin\left(\frac{\lambda_2-\lambda_1}{2}\right)}\right) \tag{3}$$

$$DL=\sum_{t=1}^{DD-1}d_t \tag{4}$$

式中:d表示地球上两点之间的距离;r表示地球的半径;φ_1和φ_2分别表示点1的纬度和点2的纬度;λ_1和λ_2分别表示点1的经度和点2的经度;DD表示某一干旱事件的持续时间;d_t表示t月的质心与t+1月的质心之间的距离。

3 结果与分析

3.1 基于三维聚类算法的干旱识别结果

基于SPEI3,通过三维聚类算法的干旱识别方法,在1981年到2020年中国地区共识别出持续2个月及以上的干旱事件102场。表2列出了干旱严重度最高的20场干旱事件及其时空特征,定量描述了每一场干旱事件的发生时间、结束时间、严重程度、影响范围、质心以及质心路径长度。经统计,在102场干旱事件中,有12.7%的干旱历时长达1 a以上,10.8%的干旱事件覆盖面积超过480×10^4 km^2,占我国国土面积的50%。同时,历时超过12个月的干旱事件的干旱严重度均位于所有干旱事件的前10%,这表明干旱历时是导致干旱严重性的重要因素。综上可知,近40 a来中国的干旱事件在时间上具有连年性和在空间上存在普遍性。

3.2 干旱特征变化分析

图3显示了102场干旱事件质心的空间分布,图中圆形的大小和颜色分别代表干旱事件的严重度和历时。干旱事件的质心在研究区内均匀分布,长历时、强烈度的大规模干旱事件主要集中在青海、甘肃、内蒙古等中国中部地区,这种"中间区域效应"主要是由研究区域边界限制造成的[39],小规模干旱事件多集中在南部地区。

根据干旱事件中干旱质心移动的方向,绘制1981—2020年我国102场干旱事件历时-频次的空间分布(图4),其中不同的颜色表示干旱历时。从堆积柱状图和玫瑰图来看,中国发生的干旱更倾向于自东向西发展。不同方向上的干旱事件持续时间并无明显规律,在东、西、南、北、东北、西北、东南和西南8个方向中,西部地区发生的干旱事件累计值最高,达到36场,占干旱总次数的35.3%,若加之西北、西南方向的干旱事件,共计有干旱事件64场,占干旱总次数的62.7%。其中西北向干旱事件有16场,西南向干旱事件有12场。其他方向的干旱事件略显弱势,东、东北、北、南、东南的干旱次数分别为12、8、10、2场和6场。

根据每场干旱事件的逐月干旱严重度、逐月干旱面积、逐月干旱烈度,绘制1981—2020年干旱时间的时间演变情况,通过不同的颜色标记不同历时的干旱事件,矩形表示单次干旱事件所影响的面

表2 1981—2020年中国20场最严重干旱事件

Tab. 2 The 20 most severe drought events in China during 1981−2020

序号	起始时间/年-月	干旱历时/个月	干旱烈度	干旱严重度/10^7 km²	干旱面积/10^6 km²	干旱质心			干旱质心路径/km	备注
						纬度(N)	经度(E)	时间/年-月		
1	2008-08—2009-09	14	0.44	4.91	8.00	38.13	103.13	2009-04	5553.09	干旱事件d
2	2010-11—2011-11	13	0.51	3.67	5.52	32.13	109.88	2011-04	4377.83	
3	2018-10—2020-07	22	0.40	3.32	3.78	41.88	120.63	2019-07	8027.61	干旱事件f
4	1998-10—1999-06	9	0.61	3.30	6.01	33.38	105.13	1999-02	3278.50	干旱事件b
5	2001-02—2002-04	15	0.36	2.89	5.40	40.63	112.88	2001-09	6381.09	
6	2004-02—2004-11	10	0.40	2.66	6.70	39.38	106.38	2004-06	7401.21	
7	2009-09—2010-07	11	0.44	2.58	5.37	31.63	101.63	2010-01	4907.81	
8	2017-03—2018-06	16	0.31	2.37	4.82	41.38	108.63	2017-12	7257.69	
9	2013-07—2014-09	15	0.28	2.30	5.57	36.38	103.63	2013-12	7550.17	
10	2015-07—2016-06	12	0.40	2.19	4.53	34.88	91.63	2015-12	3549.72	
11	1996-10—1997-12	15	0.28	2.07	4.94	35.13	111.13	1997-08	4298.00	
12	2012-12—2013-05	6	0.68	2.05	5.04	35.38	100.63	2013-03	2246.02	干旱事件e
13	1984-03—1985-05	15	0.51	2.01	2.64	34.88	89.13	1984-10	3309.17	
14	1986-08—1987-09	14	0.32	1.74	3.89	32.63	98.38	1987-03	4501.10	干旱事件a
15	2007-06—2008-05	12	0.90	1.74	1.61	46.88	123.13	2007-11	1444.02	干旱事件c
16	2006-03—2006-10	8	0.48	1.70	4.39	34.38	106.63	2006-07	2247.29	
17	2014-07—2015-05	11	0.27	1.44	4.93	38.88	110.38	2015-01	6247.83	
18	1991-04—1991-12	9	0.37	1.35	4.02	33.38	108.13	1991-09	3548.70	
19	2019-09—2020-08	12	0.33	1.34	3.37	40.63	94.63	2020-03	6040.55	
20	2017-11—2018-07	9	0.38	1.34	3.93	31.13	98.63	2018-02	3783.17	

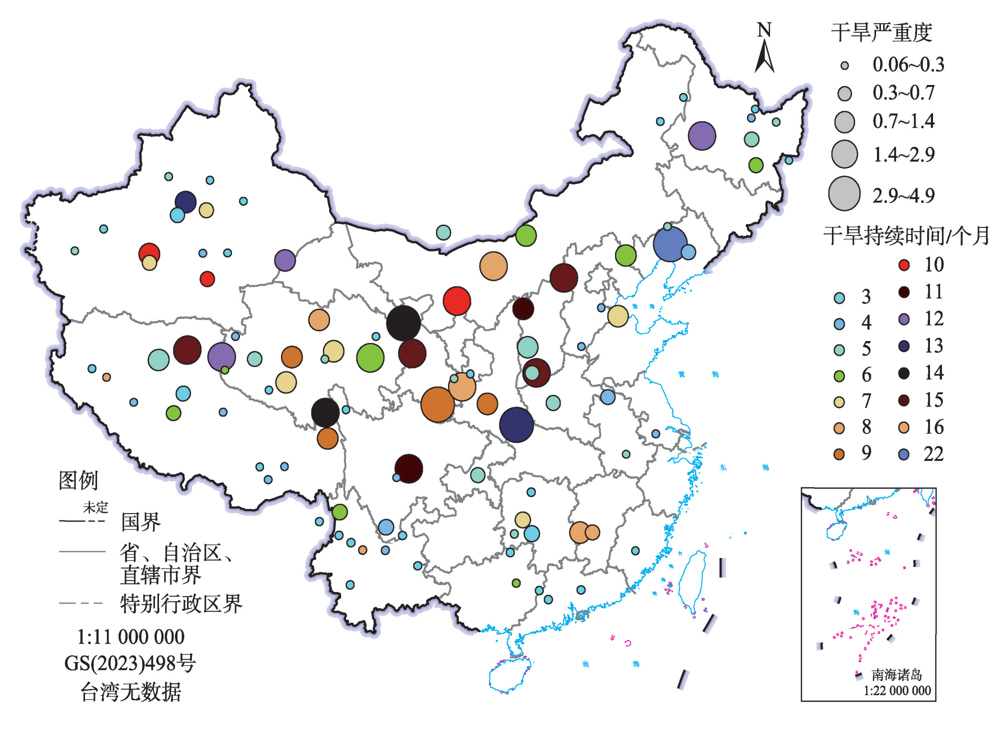


图3 干旱质心空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of drought centroids

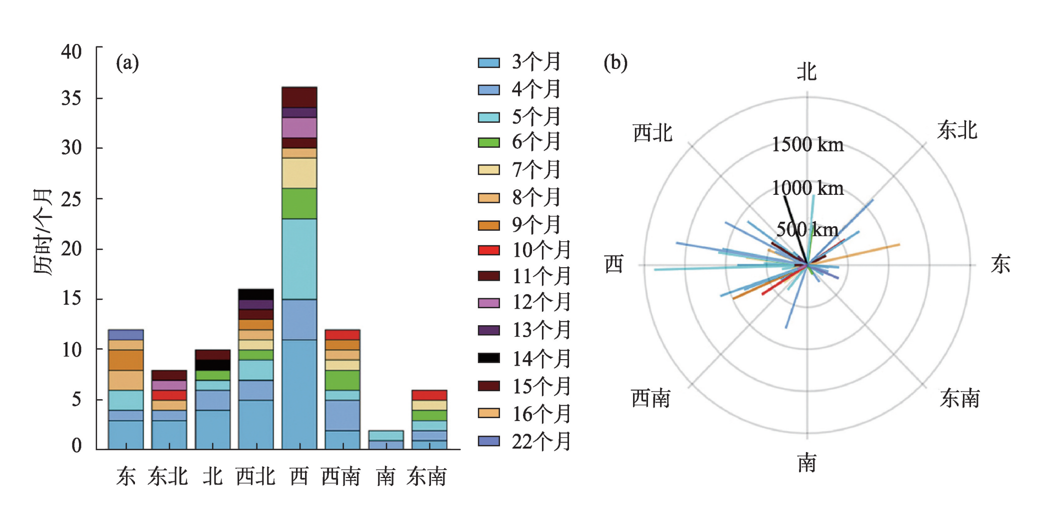
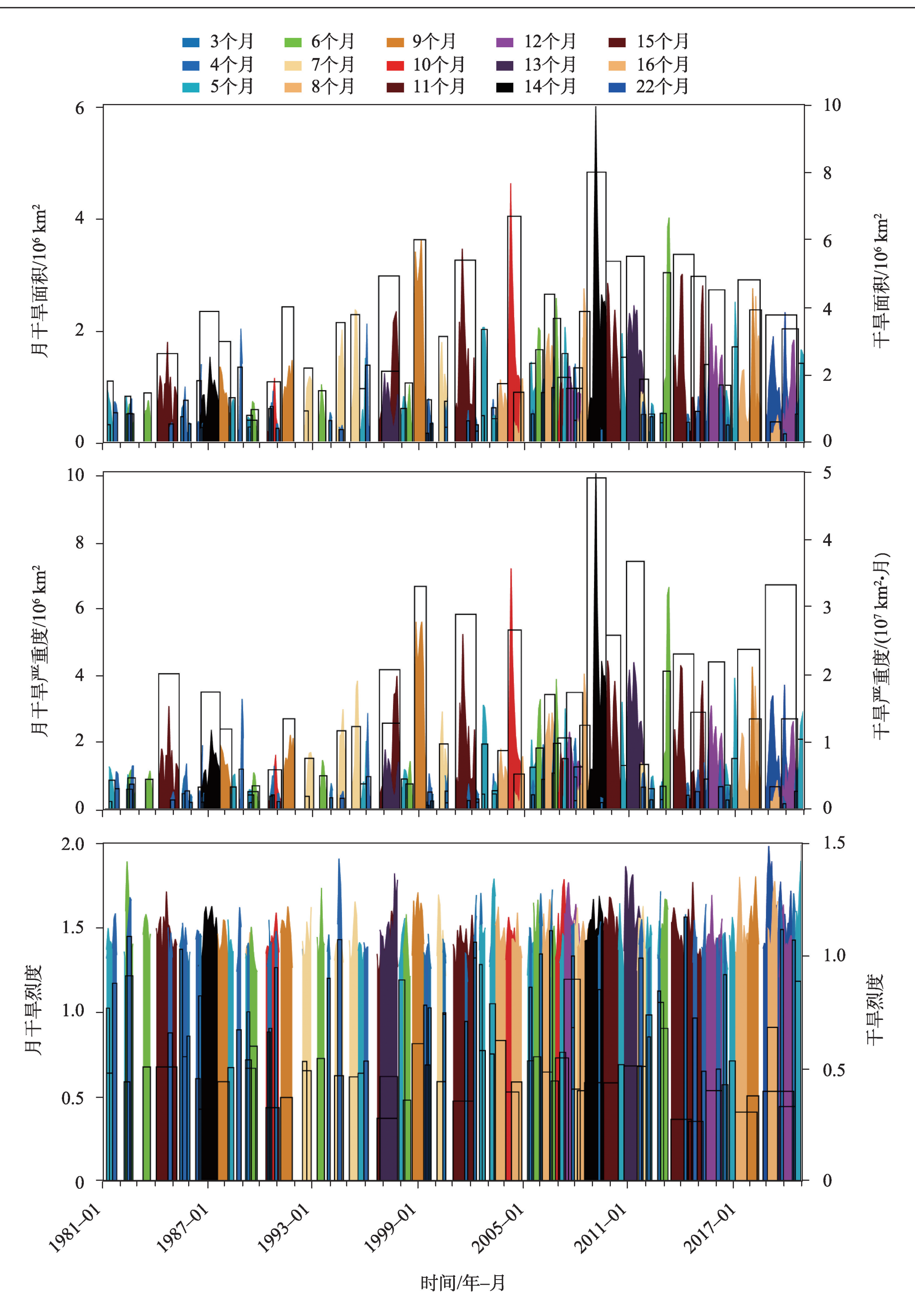


图4 1981—2020年中国干旱事件动态特征干旱历时(a)与干旱移动方向(b)

Fig. 4 Drought dynamic characteristics (a) the stacked column of drought duration (b) the directional rose diagram of drought direction in mainland China during 1981−2020

积。如图5所示,从时间分布上看,各个干旱事件的时间重叠度较高,且不同地区同时发生干旱事件的情况较多。从长时间序列的分布密度来看,覆盖范围广且严重度高的干旱事件较多的发生于2005—2010年之间。干旱严重度与干旱面积的相关性较高,但烈度与历时和严重度的相关性较弱。这说明干旱事件发生覆盖面积越广更易引发高严重度干旱事件。比如,2008年8月至2009年9月发生的干旱事件,干旱面积覆盖了研究区80%的地区,其受旱面积大,局部灾情重等特点[40],使其成为研究区近40 a来最严重的干旱事件。根据干旱面积、干旱严重度及干旱烈度时间演化情况来看(图5),在102场干旱事件中,约40%的干旱事件呈现出干旱面积和干旱严重度的多峰现象,即一场干旱事件过程中,其干旱面积和严重度变化出现多个峰值。超过半数(57.84%)的干旱事件在干旱烈度变化中呈现



注:矩形为单个干旱事件的影响面积。

图5 1981—2020年中国干旱事件的严重度、面积、烈度的时间演变

Fig. 5 Temporal evolution of the severity, area and intensity of drought events in China, 1981–2020

多峰现象。不同特征的干旱事件多峰现象不利于干旱事件发展的预估,这是由于当某一干旱特征(干旱烈度、干旱严重度、干旱面积)由升转降时并不能代表干旱的结束,也许会产生新的上升趋势。

受气候变化的影响,中国地区三维干旱特征变化情况较为复杂,图6以5 a为周期统计了干旱事件的累计频次、历时均值、烈度均值、严重度均值和面积均值。可以看出,40 a来,单场干旱事件的持续月数均值随时间变化呈现明显的抬升趋势;干旱烈度均值稳定在0.6左右;干旱历时均值、干旱严重度均

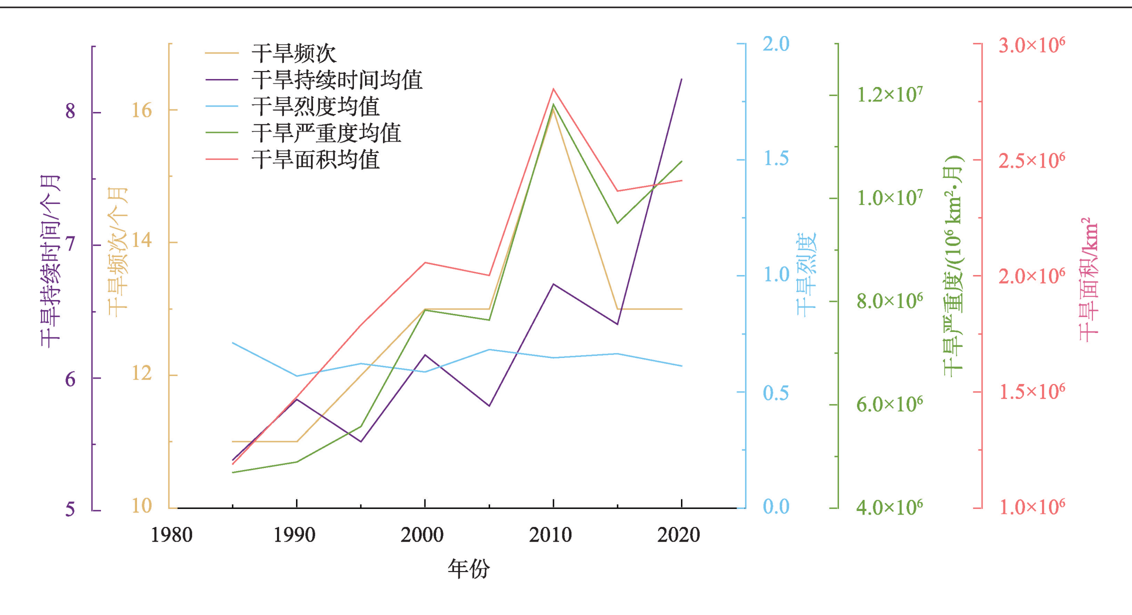


图6 1981—2020年中国干旱特征年代际变化

Fig. 6 Decadal change plot of drought characteristics in China during 1981-2020

值、干旱面积均值趋势大致相同,呈先抬升后轻微下降的形势。综合来看,2000年之后长历时干旱事件发生次数明显增多,2005—2010年间发生长历时干旱事件16场,平均干旱历时和面积分别为6.7个月和2.8×10⁶ km²,历时长、烈度高、影响面积广的干旱事件大多发生在2005—2010年。

3.3 典型三维干旱事件分析

为分析典型干旱事件的空间格局和时间演变特征,本文根据三维干旱特征值的不同,从最严重的20场干旱事件中,再次选取出严重度最高、烈度最高、历时最长\最短、同等严重度下历时较短、同等严重度下烈度较强的6场典型干旱事件,并在表2中以淡黄色背景标记。图7和图8展示了典型干旱事件三维结构及特征变量的时间趋势。由图8可知,在单场干旱事件中,干旱严重度、干旱面积和干旱烈度的逐月变化趋势基本一致。

通过干旱事件d(图7d)可以明显看出,作为研究时段内最严重的干旱事件,本场干旱事件的干旱强度高、影响面积广,从中国东北地区逐步发展至中国西部地区,而后其干旱质心向东移动,最终在中国中部地区消失,覆盖面积达8.00×10⁶ km²,约占中国陆地面积的80%,历时长达14个月。在2009年2月,此次干旱事件达到覆盖面积上的峰值,其覆盖面积超过5.00×10⁶ km²。在前人研究中验证了2008年10月至2009年3月我国北方地区出现的秋冬连旱现象[41-42],研究中描述了此次旱情在2008年10月以后逐渐加重,2009年1月下旬各地旱情达到了最严重的程度。

干旱事件f(图7f)是近40 a来发生的历时最长的干旱事件,共历时22个月。在历时较长的干旱事件中,干旱严重度、干旱面积等特征往往会产生多个峰值。这种多峰现象不利于干旱发生发展过程的预测,比如干旱严重度等特征的暂时降低可能被错误地认为是干旱进入消亡期。此次干旱事件主要发生在中东部地区,累计覆盖面积为3.78×10⁶ km²,远小于干旱事件d的面积。在中国应急管理部发布自然灾害基本情况中描述到,2019年东北地区遭遇春旱,山西、河南等地出现阶段性夏伏旱,华北、西南和东北地区夏伏旱[43],其描述的干旱影响范围与本文识别的干旱面积基本一致。

干旱事件a(图7a)的历时与干旱事件d(图7d)相同,但其干旱严重程度远小于干旱事件d(图7f),究其原因,主要是其干旱面积不同。干旱事件a从中国中部地区逐步向西发展,干旱受灾范围相对集中,其峰值出现在本场干旱发生的第8个月,其单月干旱影响面积达到了1.54×10⁶ km²。由此可知,在干旱事件历时相同的情况下,干旱覆盖面积都对干旱事件的严重程度起决定性作用。干旱事件c(图7c),发生在中国的东北地区,与干旱事件a的干旱严重度相同(均为1.74×10⁷ km²),值得注意的是,尽管干旱事件c的历时短且覆盖面积小,但其干旱烈度却比干旱事件a高出了0.58,说明在干旱严重度

相同的状态下，干旱烈度越小，干旱面积则越大，反之亦然。

干旱事件b(图7b)的严重度在所识别干旱事件中位列第4，与同等严重度的干旱事件相比，此次干旱事件的历时较短，表明此次干旱事件发生短促而剧烈。该干旱事件发生自陕西、山西以及内蒙古交汇处，而后迅速蔓延至全国，直至1999年4月，干旱质心移动至西藏地区，而后逐渐消亡。干旱事件e(图7e)，此次干旱事件的历时为6个月，是中国1980—2020年最严重的20场干旱事件中历时最短的干旱事件，但其干旱烈度处于第2位。与干旱事件b的干旱特征一致，此干旱事件的发生发展同样的短促而剧烈，值得注意的是，干旱事件e在一个月内消亡，消亡期十分短暂。

以上干旱事件与有关研究文献[44]相符合，每场干旱事件的发生发展时间和影响范围与记载的一致性较高，进一步验证了本文提出的三维聚类算法干旱识别是合理可靠的。

为分析典型干旱事件的发生发展过程、逐月空间影响范围等特征，本文进一步分析了研究时段内烈度最强干旱事件(2007年6月至2008年5月)的时空动态演变过程。图9绘制了干旱事件发生至消亡的时空动态演变全过程及其逐月迁移路径，点代表每个月干旱集群的质心，连接质心之间的箭头为干旱迁移路径。由图可知，本场干旱事件的源头在内蒙古北部地区，发生干旱时质心在赤峰市，随后干旱迅速蔓延至东北地区全域，干旱质心向东北方向迁移至白城市；8月至9月，干旱继续向北发展，干旱严重程度持续增加，旱情最为严重，单月干旱面积达到峰值($1.38×10^6$ km^2)；10月干旱分散为两个部分，旱情由此开始衰减；11月至次年1月，干旱中心向西迁移至齐齐哈尔市；2月至3月，干旱中心向东渐渐移动；4月至5月，干旱中心持续向北移动，最终移动至呼伦贝尔市北部，并最终在此消亡。综合来看，本次干旱事件从2007年6月至次年5月共历时12个月，此干旱生长期较短(2007年6月至2007年9月，共4个月)，衰减时间较长(2007年10月至2008年5月，共8个月)，旱情经历了生长期-强化期-峰值期-衰减期-消亡期5个阶段；干旱质心移动方向由南向北迁移，迁移路径大致为赤峰市→白城市→

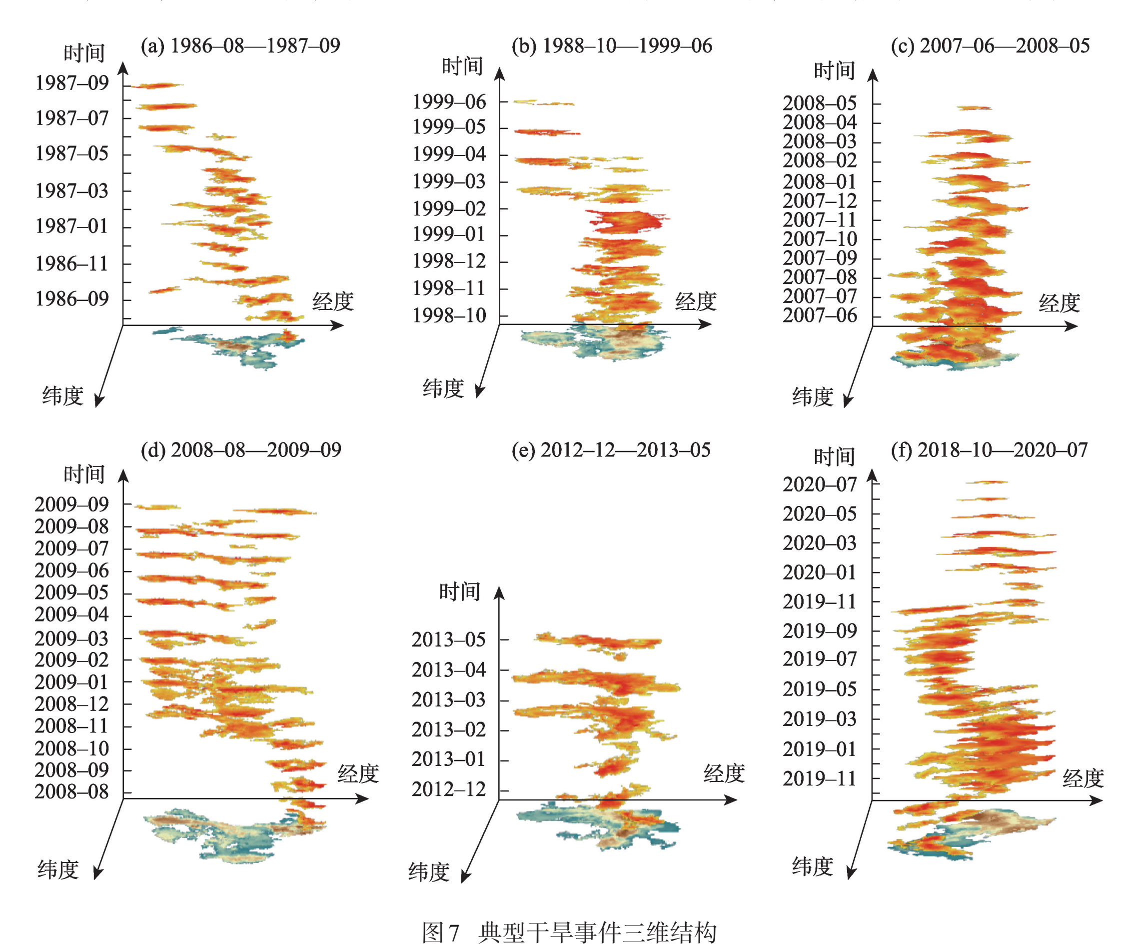


图7 典型干旱事件三维结构

Fig. 7 The three dimensional structure of typical drought events

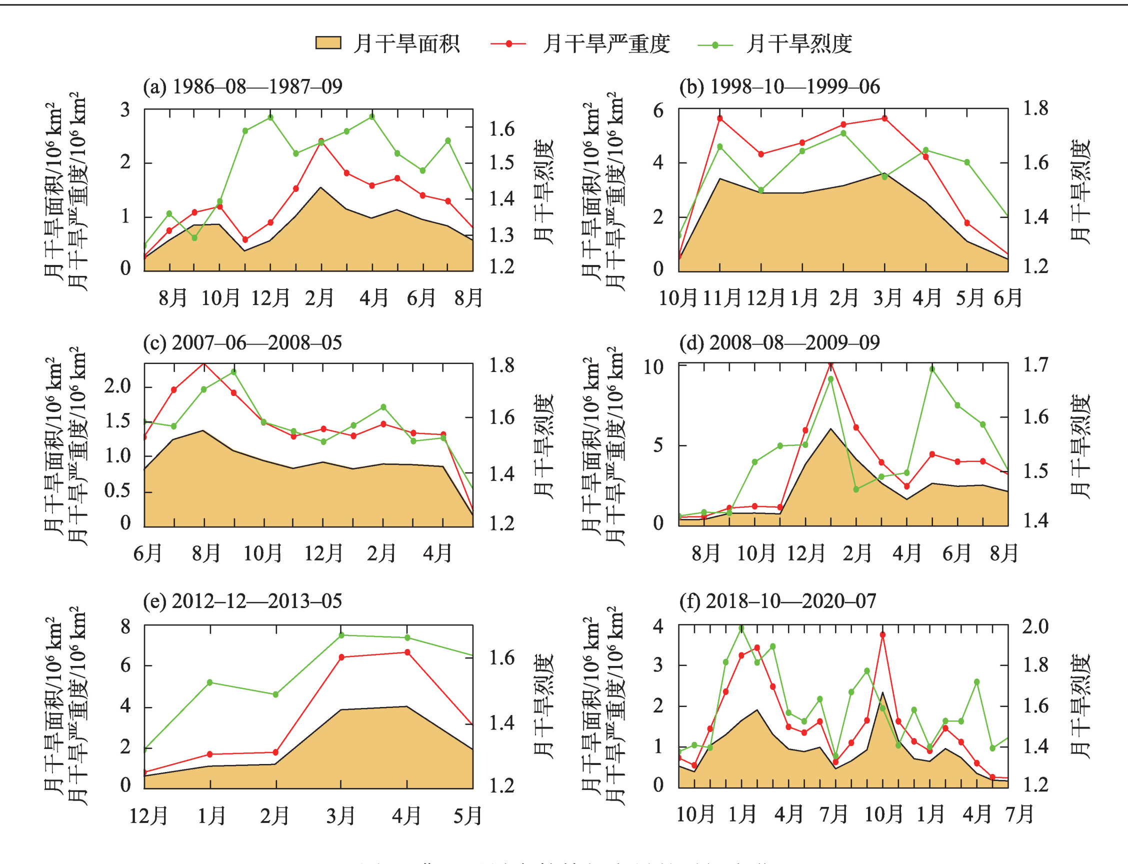


图8 典型干旱事件特征变量的时间变化

Fig. 8 Temporal changes of the characteristics of typical drought events

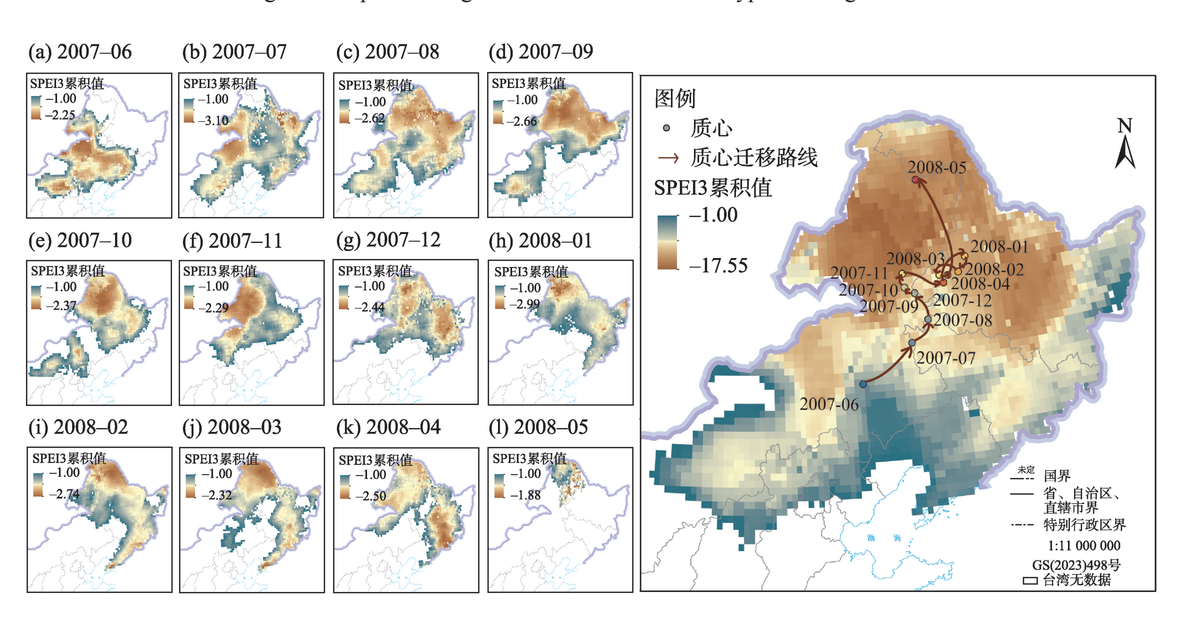


图9 2007年6月至2008年5月的干旱事件时空动态演变过程及其逐月迁移路径

Fig. 9 Evolution of the spatial and temporal dynamics of drought events from June 2007 to May 2008 and their migration paths from month to month

大庆市→呼伦贝尔市南部→齐齐哈尔市→呼伦贝尔市北部。此次干旱事件与中国气象干旱图集[44]中2007年秋季干旱、2008年春季干旱重合度较高,进一步验证了三维聚类算法识别干旱事件的可靠性。

4 结论与讨论

本文以中国为研究区,从三维视角出发,识别1981—2020年间的干旱事件,并系统分析干旱事件

的历时、严重度、烈度、影响面积等基本特征和移动路径、发展方向等动态特征。基于三维聚类算法的干旱事件识别方法能够为揭示干旱时空变化规律提供新途径,研究结论有助于深化中国干旱事件发生发展过程的认识和理解。本文主要结论如下:

与历史文献资料对比分析,结果表明三维聚类算法能有效识别区域气象干旱事件,1981—2020年间共识别历时超过2个月的干旱事件102场。研究时段内,最严重干旱事件发生于2008年8月至2009年9月期间,共历时14个月,影响了中国超80%的面积。不同干旱事件的时空特征差异显著,同一个干旱事件逐月烈度、逐月严重度等特征随时间的变化区别也较明显。

基于干旱事件的质心分布情况以及历时图、移动方向玫瑰图分析发现,中国发生的长历时、强烈度的大规模干旱事件主要集中于中西部地区,且62.7%的干旱事件更倾向于自东向西发展。通过逐月分析干旱事件的特征变化,发现中国发生的干旱事件时间重叠度较高。从长时间序列的分布密度来看,覆盖范围广且严重度高的干旱事件较多的发生于2005—2010年之间。在102场干旱事件中,约40%的干旱事件呈现出干旱面积和干旱严重度的多峰现象,超过半数(57.84%)的干旱事件在干旱烈度变化中呈现多峰现象,干旱事件的多峰现象不利于干旱事件发展的预估。

本文针对干旱过程在时空维度下的演变特征开展研究仍存在一些待改进之处。首先,SPEI干旱指数是基于降水和潜在蒸散发计算得到,本质上反映的是气象干旱[32],并未考虑下垫面植被类型、地形等因素的影响。其次,部分研究[33]表明,以研究区1.6%的面积比重作为最小干旱聚类面积阈值能够有效提取三维干旱事件并避免干旱聚类碎斑出现,然而不同阈值的大小会导致干旱事件提取结果的差异,其阈值选取的合理性仍有待进一步验证。最后,三维聚类干旱识别算法虽然能够有效避免干旱事件的动态信息丢失的问题[45],但同时面临算法相对较复杂的问题。

参考文献(References):

[1] Barros V, Stocker T F. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: Special report of the intergovernmental panel on climate change[J]. Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 2012, 18(6): 586-599.

[2] Zhang X, Chen N, Sheng H, et al. Urban drought challenge to 2030 sustainable development goals[J]. Science of the Total Environment, 2019, 693: 133536-133547.

[3] Su B, Huang J, Fischer T, et al. Drought losses in China might double between the 1.5 degrees C and 2.0 degrees C warming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of The United States of America, 2018, 115(42): 10600-10605.

[4] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 500-521. [Zhang Qiang, Yao Yubi, Li Yaohui, et al. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3): 500-521.]

[5] Guo H, Bao A, Ndayisaba F, et al. Space-time characterization of drought events and their impacts on vegetation in Central Asia[J]. Journal of Hydrology, 2018, 564: 1165-1178.

[6] 任朝霞, 杨达源. 近40 a西北干旱区极端气候变化趋势研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(4): 10-13. [Ren Zhaoxia, Yang Dayuan. Study on trends of extreme climate change in the arid region of Northwest China in resent 40 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(4): 10-13.]

[7] 李天水, 王顺, 庄文化, 等. 游程理论和Copula函数在二维干旱变量联合分布中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(6): 77-82. [Li Tianshui, Wang Shun, Zhuang Wenhua, et al. Application of the theory of run and Copula function to the joint distribution of two-dimension drought variables[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(6): 77-82.]

[8] Huang S, Li P, Huang Q, et al. The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors[J]. Journal of Hydrology, 2017, 547: 184-195.

[9] Tatli H, Türkeş M. Empirical orthogonal function analysis of the palmer drought indices[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(7): 981-991.

[10] 朱亚芬. 530年来中国东部旱涝分区及北方旱涝演变[J]. 地理学报, 2003, 58(S1): 100-107. [Zhu Yafen. The regional division of dryness/wetness over Eastern China and variations of dryness/wetness in northern China during the last 530 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(S1): 100-107.]

[11] Andreadis K M, Clark E A, Wood A W, et al. Twentieth-century drought in the conterminous United States[J]. Journal of Hydrometeorology, 2005, 6(6): 985-1001.

[12] Lloyd-Hughes B. A spatio-temporal structure-based approach to drought characterisation[J]. International Journal of Climatology, 2012, 32(3): 406-418.

[13] Liu Y, Zhu Y, Ren L, et al. Understanding the spatiotemporal links between meteorological and hydrological droughts from a Three- Dimensional Perspective[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(6): 3090-3109.

[14] Wen X, Tu Y, Tan Q, et al. Construction of 3D drought structures of

meteorological drought events and their spatio-temporal evolution characteristics[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590(6): 125539−125550.

[15] Xu K, Yang D, Yang H, et al. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961−2012: A climatic perspective[J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 253−264.

[16] 冯凯, 粟晓玲. 基于三维视角的农业干旱对气象干旱的时空响应关系[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 103−113. [Feng Kai, Su Xiaoling. Spatiotemporal response characteristics of agricultural drought to meteorological drought from a three-dimensional perspective[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 103−113.]

[17] 邓翠玲, 佘敦先, 张利平, 等. 基于图像三维连通性识别方法的长江流域干旱事件特征[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 131−139. [Deng Cuiling, She Dunxian, Zhang Liping, et al. Multi-model projections of meteorological drought characteristics under different scenarios in the middle and lower reaches of Yangtze River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(11): 131−139.]

[18] Du X, Jin X, Yang X, et al. Spatial-temporal pattern changes of main agriculture natural disasters in China during 1990−2011[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(4): 387−398.

[19] 吴鹏, 谷星月, 王朋岭. 中国气候变化蓝皮书(2022)发布[N]. 2022-08-04, 2022: 001. [Wu Peng, Gu Xingyue, Wang Pengling. Blue Book on Climate Change of China 2022 Rolled Out[N]. 2022-08-04, 2022: 001.]

[20] Zhai J, Su B, Krysanova V, et al. Spatial variation and trends in PDSI and SPI indices and their relation to streamflow in 10 large regions of China[J]. Journal of Climate, 2010, 23(3): 649−663.

[21] 郝立生, 马宁, 何丽烨. 2022年长江中下游夏季异常干旱高温事件之环流异常特征[J]. 干旱气象, 2022, 40(5): 721−732. [Hao Lisheng, Ma Ning, He Liye. Circulation anomalies characteritics of the abnormal drought and high temperature event in the middle and lower reaches of the Yangtze River in summer of 2022[J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(5): 721−732.]

[22] 李忆平, 张金玉, 岳平, 等. 2022年夏季长江流域重大干旱特征及其成因研究[J]. 干旱气象, 2022, 40(5): 733−747. [Li Yiping, Zhang Jinyu, Yue Ping, et al. Study on characteristics of severe drought event over Yangtze River Basin in summer of 2022 and its causes[J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(5): 733−747.]

[23] 张强. 科学解读"2022年长江流域重大干旱"[J]. 干旱气象, 2022, 40(4): 545−548. [Zhang Qiang. Scientific interpretation of severe drought in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(4): 545−548.]

[24] Shen Y, Feng M, Zhang H, et al. Interpolation methods of China daily precipitation data[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(3): 279−286.

[25] Shen Y, Xiong A. Validation and comparison of a new gauge-based precipitation analysis over mainland China[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(1): 252−265.

[26] Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A, et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(9): 4349−4383.

[27] Zandler H, Senftl T, Vanselow K A. Reanalysis datasets outperform other gridded climate products in vegetation change analysis in peripheral conservation areas of Central Asia[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 22446.

[28] Xue C, Wu H, Jiang X. Temporal and spatial change monitoring of drought grade based on ERA5 analysis data and BFAST method in the Belt and Road area during 1989−2017[J]. Advances in Meteorology, 2019, 2019: 4053718−4053729.

[29] Chen H, Sun J. Changes in drought characteristics over China using the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2015, 28(13): 5430−5447.

[30] 周扬, 李宁, 吉中会, 等. 基于SPI指数的1981—2010年内蒙古地区干旱时空分布特征[J]. 自然资源学报, 2013, 28(10): 1694−1706. [Zhou Yang, Li Ning, Ji Zhonghui, et al. Temporal and spatial patterns of droughts based on Standard Precipitation Index (SPI) in Inner Mongolia during 1981−2010[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(10): 1694−1706.]

[31] 王荣江, 李谢辉, 周任君, 等. 三种气象干旱指数在四川省的适用性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(3): 734−744. [Wang Rongjiang, Li Xiehui, Zhou Renjun, et al. Applicability analysis of three meteorological drought indices in Sichuan Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(3): 734−744.]

[32] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696−1718.

[33] Wang A, Lettenmaier D P, Sheffield J. Soil moisture drought in China, 1950−2006[J]. Journal of Climate, 2011, 24(13): 3257−3271.

[34] 王姣妍. 基于MSWEP降水产品的新疆干旱时空特征分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1398−1409. [Wang Jiaoyan. Study on spatiotemporal characteristics of drought in Xinjiang based on Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation multi-source merged precipitation product[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1398−1409.]

[35] Guo H, Bao A, Liu T, et al. Meteorological drought analysis in the lower Mekong Basin using satellite-based long-term CHIRPS product[J]. Sustainability, 2017, 9(6): 1−21.

[36] Ma B, Zhang B, Jia L, et al. Conditional distribution selection for SPEI-daily and its revealed meteorological drought characteristics in China from 1961 to 2017[J]. Atmospheric Research, 2020, 246: 105108−105119.

[37] Guo H, Bao A, Liu T, et al. Spatial and temporal characteristics of droughts in Central Asia during 1966−2015[J]. Science of the Total Environment, 2018, 624: 1523−1538.

[38] Diaz V, Corzo Perez G A, Van Lanen H A J, et al. Characterisation

of the dynamics of past droughts[J]. Science of the Total Environment, 2020, 718: 134588-134600.

[39] Colwell R K, Lees D C. The mid-domain effect: Geometric constraints on the geography of species richness[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2000, 15(2): 70-76.

[40] 冯琳. 2009年全国旱灾及抗旱行动情况[J]. 中国防汛抗旱, 2010, 20(1): 76-79. [Feng Lin. National drought and drought action in 2009[J]. China Flood & Drought Management, 2010, 20(1): 76-79.]

[41] 王红军, 白爱娟. 2008/2009年冬季大气环流异常对我国东部严重干旱的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(11): 104-109. [Wang Hongjun, Bai Aijuan. The severe drought in eastern China by the anomalies atmospheric circulation in winter 2008[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(11): 104-109.]

[42] 江东, 付晶莹, 庄大方, 等. 2008—2009年中国北方干旱遥感动态监测[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(3): 92-101. [Jiang Dong, Fu Jingying, Zhuang Dafang, et al. Dynamic drought-remote sensing monitoring in North China from 2008 to 2009[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(3): 92-101.]

[43] 中国水旱灾害防御公报编写组.《中国水旱灾害防御公报2020》概要[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(11): 7. [Compilation group of China Flood and Drought Disaster Prevention Bulletin. Summary of China Flood and Drought Disaster Prevention Bulletin 2020[J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(11): 7.]

[44] 中国气象局. 中国气象干旱图集[M]. 北京: 气象出版社, 2010. [China Meteorological Administration. Atlas of China's Meteorological Drought[M]. Beijing: Meteorological Press, 2010.]

[45] 冯凯, 李彦彬, 王飞, 等. 基于改进三维识别方法的西北地区干旱事件分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 63-72. [Feng Kai, Li Yanbin, Wang Fei, et al. Analysis of drought events in Northwest China based on an improved three-dimensional identification method[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 63-72.]

Characterization of the evolution of drought events in China based on 3D identification

LYU Xiaoyu[1], GUO Hao[1], MENG Xiangchen[1], BAO Anming[2], TIAN Yunfei[1], ZHU Li[1]

(1. School of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao 276826, Shandong, China;
2. Xinjing Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Globally, China is one of the country's most frequently and severely affected by drought. These frequent drought events have subsequently caused serious economic, social development, and ecological environment losses. Drought simultaneously leads to alterations in both space and time, and this paper aims to identify drought events and quantify their spatial and temporal dynamic evolution using a three-dimensional clustering algorithm for mainland China, from 1981-2020. The three-dimensional clustering algorithm can be used to effectively identify drought events and describe their dynamic processes. From 1981-2020 there were 102 drought events lasting 2 months or more in mainland China. Spatially, the trajectory of drought events was found to show a tendency to develop from east to west. Temporally, there are high time overlaps between different drought events. In addition, drought events with wide coverage and high severity were concentrated in the period from 2005-2010. The findings of this paper will help to elucidate the spatial and temporal evolution patterns of drought events and provide scientific references for drought monitoring and drought risk management in mainland China.

Keywords: three-dimensional clustering algorithm; drought event; three-dimensional evolutionary features; dynamic evolution; SPEI; China